

報告 スリップフォーム工法により構築した防液堤コンクリートの耐久性

近松 竜一^{*1}・桜井 邦昭^{*2}・大西 俊輔^{*3}・西崎 丈能^{*4}

要旨: スリップフォーム工法により構築した PC 防液堤コンクリートのかぶり部分からコアを採取し、表層部の耐久性について調査した。その結果、早期の脱枠や型枠の滑動による表層の品質への影響は 20mm 以浅の範囲に限定されること、50 年の設計耐用期間において中性化は表層しか進行しないこと、鋼材位置の 50 年後の塩化物イオン量は $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下で、鋼材腐食に対する耐久性を有していること、などが明らかとなった。

キーワード: LNG 貯槽, PC 防液堤, スリップフォーム, 耐久性, 中性化深さ, 塩化物イオン量

1. はじめに

天然ガスを -162°C の極低温で液化した LNG は、環境に優しいクリーンなエネルギーである。この LNG を貯留する地上式貯槽として、金属二重殻式の内槽と PC 製の防液堤を一体化した LNG 貯槽が数多く建設されている¹⁾。近年においては、エネルギー需要の増大に伴い、LNG 貯槽の大容量化や工期短縮に向けた施工の合理化が求められている。そこで、急速化施工の観点から、PC 防液堤の構築にスリップフォーム工法を採用した。

スリップフォーム工法は、型枠を連続して上昇させながらコンクリートを打ち込む工法であり、煙突やタワーなど縦長の構造物に対する施工実績が多い²⁾。しかし、今回適用した LNG 貯槽の防液堤は全周が 280m と大きく、このような大型構造物への適用は前例がない。

大口径の防液堤をスリップフォーム工法により構築するうえで、コンクリートには薄層で広範囲に充填できる流動性、型枠の滑動と脱枠時強度の確保を両立させるための若材齢時の強度発現の制御、および供用期間中の鋼材腐食に対する耐久性が求められる。そこで、これらの要求性能を満たすコンクリートの仕様を選定し、総量 $10,000\text{m}^3$ のコンクリートの品質を管理し、1 日当たり 2m のペースで 20 日間で 40m の防液堤を構築した^{3), 4)}。

防液堤コンクリートの表層は、打込み直後から型枠の滑動により外力の作用を受ける。また、脱枠後は若材齢時から気中に晒されるため、温度や湿度、日射や風など気象作用の影響を受ける。このため、防液堤の耐久性を評価するには表層の品質を検証しておく必要がある。そこで、防液堤コンクリートのかぶり部分からコア(以下、防液堤コアと呼称する)を採取し、それらの品質を調査した。また、これら防液堤コアを対象に中性化、塩化物イオンの促進試験を実施し、鋼材腐食に対する耐久性について検証した。

2. スリップフォーム工法による施工概要

2.1 防液堤の施工概要

LNG 貯槽(容量 23万 m^3)の概要を図-1 に示す。

防液堤は、内径 89.2m、高さ 43.6m、壁厚 80cm で、その設計基準強度は高さ方向に 60、40 および $30\text{N}/\text{mm}^2$ の 3 水準に分かれている。このうち、高さ 40m までの区間にスリップフォーム工法を適用した。

スリップフォーム装置の断面図を図-2 に示す。

装置は、作業床、型枠、ヨーク(鋼製門型フレーム)、油圧ジャッキ、クライミングロット、コンクリート搬送用レールおよびバケット(容量 0.5m^3)などから構成されている。

スリップフォーム装置は、60 分毎に 10cm 上昇させることを標準とし、これに合わせて鉄筋・PC シース管を組み立て、コンクリートを打ち込んだ。打上がり高さは 15cm/層で、概ね 90 分ごとにコンクリートを打ち重ねた。

2.2 防液堤に用いたコンクリートの概要

コンクリートの配合条件を表-1 に示す。

防液堤は、周長が 280m と広く、1 層の打上がり高さは 15cm と薄い。そのため、薄層でも広範囲に流動し、軽微な締固めによって充填できる加振併用型の高流動コンクリートを用い、目標スランプフローを 50cm に設定した。また、スリップフォーム工法においてコンクリートが型枠から外れる時点(材齢 12 時間)の目標強度を $0.1\sim 0.3\text{N}/\text{mm}^2$ とした。

中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数は、防液堤の設計耐用期間(50 年)で塩化物イオンの侵入や中性化に伴う鋼材腐食を防止するために必要な値として定めた。なお、塩化物イオン拡散係数の限度は、表面塩化物イオン量として既設防液堤における実測値を用い、鋼材腐食発生限界濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ とし算定した。

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上級主席技師 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副課長 博士(工学) (正会員)

*3 大阪ガス(株)エンジニアリング部 課長 工修 (正会員)

*4 大阪ガス(株)エンジニアリング部 シニアエンジニア 博士(工学) (正会員)

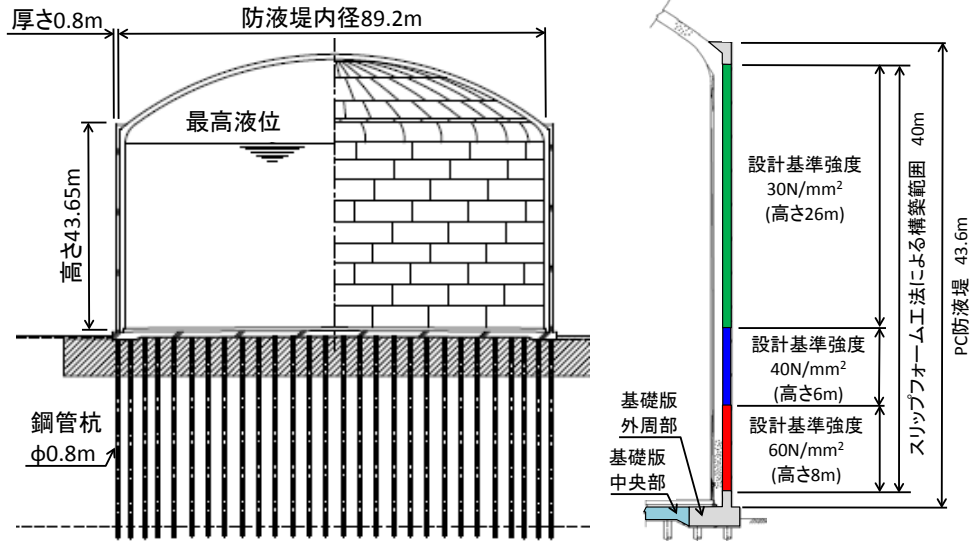


図-1 LNG貯槽のコンクリートの概要

表-1 コンクリートの配合条件

項目	特性値の目標範囲
スランプフロー	50±7.5cm
空気量	4.5±1.5%
施工時強度 (型枠取外し時)	0.1 ~ 0.3N/mm ² (材齢12時間)
設計基準強度	(1) 30N/mm ² (材齢91日) (2) 40N/mm ² (材齢91日) (3) 60N/mm ² (材齢91日)
中性化速度係数*1	8 (mm/√年) 以下
塩化物イオン 拡散係数*1	(1) W/C45%(BB) : 0.64 (cm ² /年) 以下 (2) W/C40%(M) : 0.42 (cm ² /年) 以下 (3) W/C33%(M) : 0.40 (cm ² /年) 以下

*1 本工事の構造・環境条件に対して、設計耐用期間(50年)の耐久性を確保するのに必要な値(2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]に準拠)

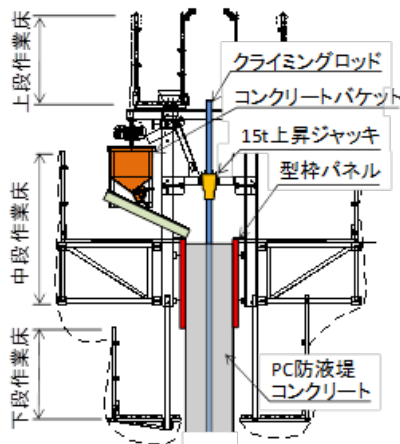


図-2 スリップフォーム装置のイメージ

使用材料の概要を表-2、コンクリートの配合の概要を表-3に示す。

セメントは、30N/mm²の部位は高炉セメントB種、40、60N/mm²の部位は中庸熱ポルトランドセメントを用いた。混和剤は、所定の流動性を付与するために各種の高性能AE減水剤を使用し、脱枠時の強度発現を制御するために遅延剤を併用した。

水セメント比は、塩害に対する耐久性をもとに設定し、設計基準強度 30、40 および 60N/mm² に対し、それぞれ 45、40 および 33% とした。したがって、いずれの部位の配合も設計基準強度に対して実際の強度水準が大きい配合となっている。

なお、W/C45% および W/C40% の配合については、防液堤のモデル試験体を製作し、材齢3ヶ月で採取したコアを用いて促進試験結果より中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数を算定し、いずれの係数も所要の限度内にあることを確認した³⁾。

表-2 使用材料

分類	記号	種類、物理的性質など
セメント	BB	高炉セメントB種、密度3.04g/cm ³
	M	中庸熱ポルトランドセメント、密度3.22g/cm ³
細骨材	S1	海砂、表乾密度2.57g/cm ³ 、吸水率2.24% 粗粒率2.60、混合比率80%
	S2	砕砂、表乾密度2.58g/cm ³ 、吸水率1.60% 粗粒率2.87、混合比率20%
粗骨材	G1	砕石2010、表乾密度2.62g/cm ³ 吸水率0.95%、実積率59.3%
	G2	砕石1505、表乾密度2.61g/cm ³ 吸水率0.92%、実積率58.6%
混和剤	SP1	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	SP2	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系) 高強度コンクリート用
	VA	高性能AE減水剤(増粘剤一液タイプ) (ポリカルボン酸系、グリコール系)
	R	遅延剤(脱枠時の強度発現制御用)

表-3 防液堤に使用した各種コンクリートの配合の概要

コンクリート種類	設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (C × %)
						W	C	S1	S2	G1	G2	
W/C45%(BB)	30	50	BB	45.0	49.4	175	389	662	166	431	429	0.90 (VA)
W/C40%(M)	40	50	M	40.0	49.5	170	425	664	167	431	429	1.10 (SP1)
W/C33%(M)	60	50	M	33.0	47.2	170	515	607	152	431	429	1.05 (SP2)

表-4 コンクリートの品質管理結果⁴⁾

試験項目	項目	単位	コンクリートの種類		
			W/C 45% (BB)	W/C 40% (M)	W/C 33% (M)
スランプフロー	試験数	回	146	32	44
	平均値	cm	46.3	48.5	50.9
	標準偏差	cm	2.5	3.5	2.7
若材齢の圧縮強度 (12時間)	試験数	回	27	7	9
	平均値	N/mm ²	0.26	0.24	0.23
	標準偏差	N/mm ²	0.07	0.07	0.04
材齢91日圧縮強度	試験数	回	50	12	17
	平均値	N/mm ²	65.6	71.1	87.3
	標準偏差	N/mm ²	2.3	1.6	2.7

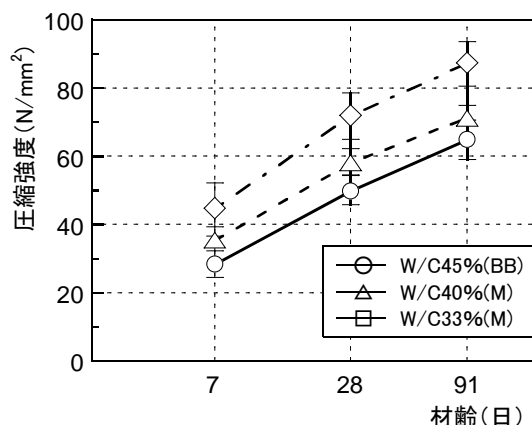


図-3 コンクリートの強度発現特性⁴⁾

実施工に際しては、現場にバッチャープラントを設置し、強制二軸練りミキサ（容量 2.5m³）によりコンクリートを製造した。1バッチの練混ぜ量は 2m³とし、50m³毎にフレッシュ時の品質を管理した。品質管理結果を表-4、強度発現特性を図-3に示す⁴⁾。

設計基準強度 30、40 および 60N/mm²の各部位の圧縮強度は、材齢 91 日でそれぞれの平均値が 66、71、87N/mm²であった。なお、材齢 1 年の圧縮強度は 70、80 および 100N/mm²程度と、長期的な強度の増進を確認した。

3. 防液堤コンクリートの表層品質に関する調査

3.1 調査の概要

材齢 1 年 3 ヶ月で防液堤のかぶり部分からコアを採取し、表層の品質を調査した。また、型枠を滑動させる以外は実際の防液堤と同じ施工条件で作製し、同一の環境下で暴露した壁モデル試験体から採取したコア（以下、壁モデルコアと呼称する）の品質も試験した。なお、壁モデルコアは材齢 1 年 6 ヶ月であるが、長期の材齢で耐久性の相対的な傾向は同様とみなし、データを比較した。

調査項目は、中性化深さ、塩化物イオン量、細孔分布である。中性化および塩化物イオン量は、実環境での測定に加え、耐久性に関する特性値を算出するために促進試験を行った。それぞれの試験の概要を以下に示す。

(1) 中性化深さ

JIS A 1152 に準拠して測定した。促進試験は JIS A 1153

に準拠し、促進条件は CO₂ 濃度 5%、20°C、相対湿度 60%、促進期間は 3 ヶ月とした。

(2) 塩化物イオン量

JIS A 1154 に準拠し、コアの表面から 10mm、10~20mm、20~40mm、40~60mm、60~80mm の塩化物イオン量を測定した。促進試験は、JSCE-G572 に準拠し、20°C、NaCl 濃度 10% の塩水中に浸漬し、促進期間は 3 ヶ月とした。

(3) 細孔径分布

ポロシメータを用いた水銀圧入法により、コアの表面から 10mm、10~20mm、20~40mm の細孔の直径および容積を測定した。

3.2 中性化深さ

防液堤コアおよび壁モデルコアの中性化深さ測定結果を表-5 に示す。また、防液堤コアの中性化状況を写真-1 に示す。

防液堤コアの中性化深さは、材齢 1 年 3 ヶ月で、W/C45% (BB) の部位は 5.0mm、W/C40% (M) の部位は 2.8mm、W/C33% (M) の部位は 0 であった。

一方、防液堤コアを促進試験した場合、W/C45% (BB) の部位では 11.2mm、W/C40% (M) の部位は 3.4mm、W/C33% (M) の部位は 0 で、W/C45% (BB) の部位のみ壁モデルコアよりも中性化が進行する結果となった。この理由として、型枠の滑動の影響による可能性が考えられる。

3.3 塩化物イオン量

防液堤コアおよび壁モデルコアの塩化物イオン量の測定結果を表-6に示す。また、これらの結果をコアの種類毎に、図-4に示す。

コアの表面から10mmの塩化物イオン量は約0.3kg/m³で、塩化物イオンの侵入が僅かに認められる。10mm以深は概ね0.1kg/m³で内在塩化物イオン量と大差ない。

塩化物イオンの浸透は材齢1年3ヶ月時点ではごく表層で、早期の脱枠や型枠の滑動による品質への影響範囲も明確でない。そこで、コアを塩水中に3ヵ月間浸漬し促進試験を行った。促進試験後の塩化物イオン量を表-6に併記した。また、これらの結果をコアの種類別に整理し、図-4に示す。

表面から20mmの範囲では、強度水準が小さい部位ほど塩化物イオン量が多い。また、防液堤コアの値の方が

壁モデルコアよりも大きい。一方、20mm以深では、いずれの部位も0.2kg/m³以下で、両者に顕著な差は認められない。

これらの結果を促進中性化試験結果と併せると、少なくとも表面から20mm以浅の範囲では、スリップフォーム工法の適用によって品質への影響があるといえる。



写真-1 実環境における防液堤コアの中性化状況

表-5 防液堤コアおよび壁モデルコアの中性化深さの測定結果

設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	セメント 種類	実環境における 中性化深さ(mm)		促進試験後の 中性化深さ(mm)	
			防液堤コア	壁モデルコア	防液堤コア	壁モデルコア
30	45.0	BB	5.0	4.4	11.2	4.0
40	40.0	M	2.8	0.0	3.4	3.5
60	33.0	M	0.0	0.0	0.0	0.0

表-6 防液堤コアおよび壁モデルコアの塩化物イオン量の測定結果

設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	セメント 種類	試験体 の種類	実環境における 塩化物イオン量 (kg/m ³)					塩水浸漬試験(3ヶ月)後の 塩化物イオン量(kg/m ³)				
				0-10 mm	10-20 mm	20-40 mm	40-60 mm	60-80 mm	0-10 mm	10-20 mm	20-40 mm	40-60 mm	60-80 mm
30	45	BB	防液堤コア	0.32	0.16	0.14	0.14	0.14	10.65	4.41	0.17	0.17	0.17
			壁モデルコア	0.21	0.15	0.15	0.13	0.11	8.12	1.09	0.11	0.17	0.17
40	40	M	防液堤コア	0.30	0.13	0.13	0.13	0.11	7.06	3.24	0.16	0.12	0.12
			壁モデルコア	0.13	0.06	0.08	0.06	0.11	4.77	0.60	0.11	0.11	0.11
60	33	M	防液堤コア	0.29	0.10	0.13	0.13	0.13	5.37	0.22	0.13	0.13	0.13
			壁モデルコア	0.15	0.11	0.09	0.11	0.07	3.38	0.75	0.11	0.09	0.09

* 実施工時の塩化物イオン量の測定値(平均); 0.06 ~ 0.09 kg/m³

* 促進試験は塩分濃度10%水溶液(塩化物イオン量は60.7kg/m³)

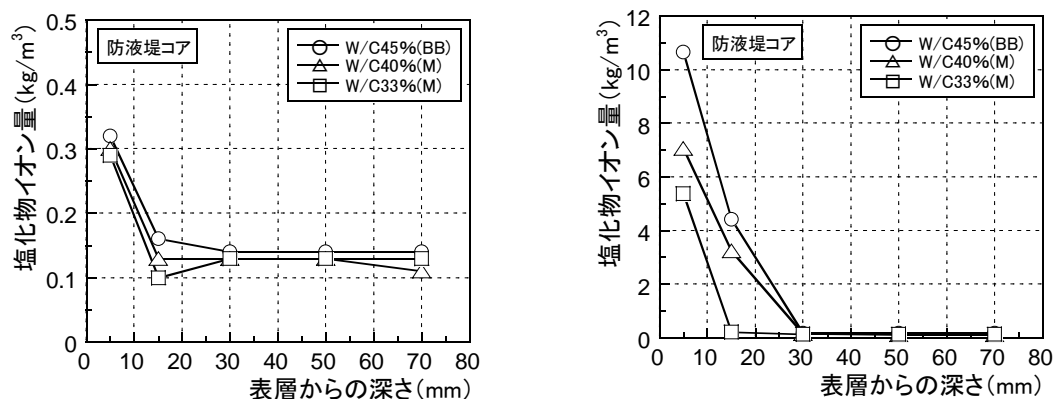


図-4 表層からの深さと塩化物イオン量 (左: 材齢1年3ヶ月(実環境), 右: 塩水浸漬試験(3ヵ月間))

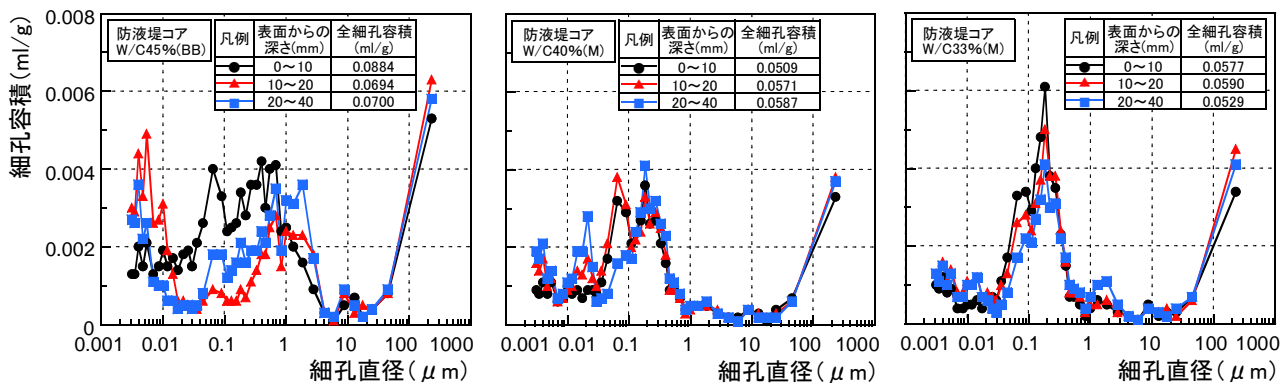


図-5 防液堤コアの細孔径分布

表-7 中性化速度係数および中性化に伴う鋼材腐食に対する照査結果

試験体の種類	設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	セメント種類	促進試験における中性化速度係数 (mm/√週)	実環境における中性化速度係数*1 (mm/√年)	鋼材腐食発生限界深さ*2 (mm)	50年後の中性化深さ*3 (mm)
防液堤コア	30	45	BB	3.1	1.73	67	14
	40	40	M	1.0	0.56	66	5
	60	33	M	0.0	0.00	66	0
壁モデルコア*4	30	45	BB	1.1 (1.3)	0.61 (0.73)	-	-
	40	40	M	1.0 (0.7)	0.56 (0.40)	-	-
	60	33	M	0.0	0.00	-	-

*1 促進試験により求めた中性化速度係数を文献5に準じて換算 *2 施工誤差としてかぶりの10%を考慮

*3 ばらつきの安全係数 1.15 *4 () 内は配合選定時の壁モデル試験体から材齢3ヶ月で採取したコアによる試験値

3.4 細孔径分布

防液堤コアの細孔径分布を図-5示す。

W/C45% (BB) の部位は、表面から10mmの範囲では10mm以深より0.05~1μmの細孔が多く、全細孔容積も大きい。一方、W/C40% (M)、W/C33% (M) の部位は、全細孔容積に顕著な差はないが、表面に近いほど0.05~1μmの範囲で小径の細孔が増加する傾向が認められる。

これらの結果は、型枠の滑動や若材齢時の脱枠により表層の細孔構造に違いが生じ、前述した中性化や塩化物イオンの促進試験結果を裏付けるものといえる。

4. 防液堤コアによる耐久性の照査

4.1 中性化による鋼材腐食に対する照査

材齢1年3ヶ月の防液堤コアを用いた促進中性化試験から算出した中性化速度係数を表-7に示す。

防液堤コアの中性化速度係数は、W/C45% (BB) の部位では1.73mm/√年で、型枠の滑動の影響がない壁モデルコアによる算定値の2.8倍、示方書に準拠して求めた計算値の約1.2倍であった。一方、W/C40% (M) の部位では0.56mm/√年、W/C33% (M) の部位は0で、壁モデルコアによる算定値と同等であった。

コンクリート標準示方書【設計編】に準拠し、中性化による鋼材腐食の耐久性を照査した結果を表-7に併記

した。50年後の中性化深さは、W/C45% (BB) の部位では14mm、W/C40% (M) の部位は5mmで、表層しか中性化は進行しないと推測される。

4.2 塩化物イオンの侵入による鋼材腐食に対する照査

材齢1年3ヶ月の防液堤コアを用いた塩水浸漬試験結果をもとにフィックの第二法則にもとづく拡散方程式から算定した見掛けの拡散係数を表-8に示す。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、W/C45% (BB) の部位は0.44 cm²/√年、W/C40% (M) の部位は0.22 cm²/√年、W/C33% (M) の部位は0.14 cm²/√年であった。これらの値は、壁モデルコアによる算定値に比べ最大2倍程度、示方書に準拠して求めた計算値と同等か若干小さい結果となった。

コンクリート標準示方書【設計編】に準拠し、塩害に対する耐久性を照査した結果を表-8に併記した。また、鉄筋位置における塩化物イオン量の推移を図-6に示す。

設計耐用期間50年後の鋼材位置での塩化物イオン量は、いずれも1.0kg/m³以下で、発錆限界塩化物イオン濃度(1.2kg/m³)の約80%と推測される。

これらの結果を総合すると、スリップフォーム工法により構築した防液堤コンクリートは、設計耐用期間において鋼材腐食に対して十分な耐久性を有しているものと考えられる。

表-8 見掛けの拡散係数および塩化物イオンの侵入による鋼材腐食に対する照査結果

試験体種類	設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	セメント種類	見掛けの拡散係数*1 (cm ² /年)	表面の塩化物イオン量*2 (kg/m ³)	最小かぶり*3 (mm)	鋼材位置の50年後の塩化物イオン量 (kg/m ³)
防液堤コア	30	45	BB	0.44	1.69	77	0.99
	40	40	M	0.22	1.90	76	0.93
	60	33	M	0.14	2.26	70	0.95
壁モデルコア*4	30	45	BB	0.28 (0.35)	-	-	-
	40	40	M	0.12 (0.39)	-	-	-
	60	33	M	0.07	-	-	-

*1 コアの塩水浸漬試験から算出 *2 既設防液堤による実測値 *3 施工誤差としてかぶりの10%を考慮

*4 ()内は配合選定時の壁モデル試験体から材齢3ヶ月で採取したコアによる試験値

*5 鋼材腐食発生限界濃度 1.2kg/m³

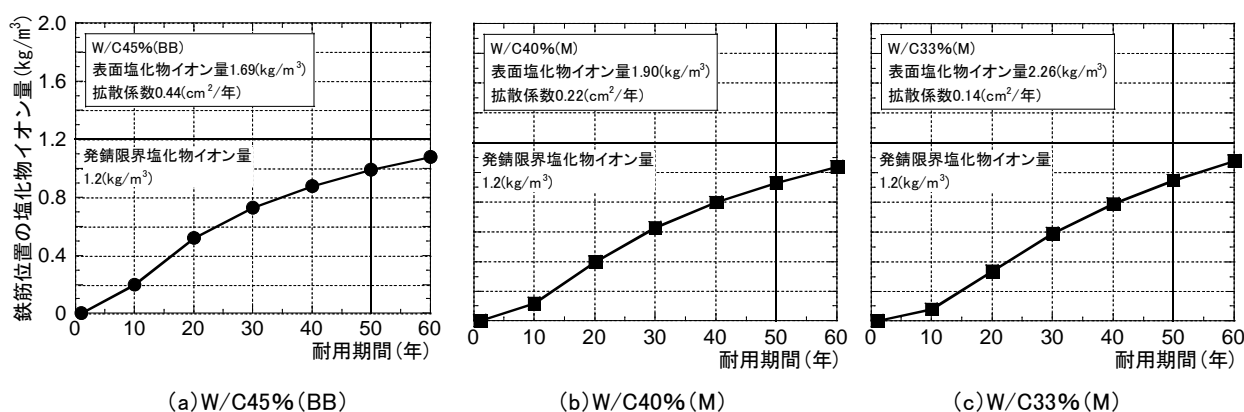


図-6 鉄筋位置における塩化物イオン量の推移

5. まとめ

大容量の地上式LNG貯槽の急速施工として、スリップフォーム工法により構築した防液堤のかぶり部分からコアを採取し、表層の耐久性について検証した。

本報告の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 防液堤コアを対象とした促進中性化試験をもとに算定される50年後の中性化深さは、最大14mmであり、中性化の進行は表層に限定されると推測される。
- (2) 防液堤コアを用いた塩水浸漬試験をもとに算定される50年後の鋼材位置での塩化物イオン量は1.0kg/m³以下と推測される。
- (3) スリップフォーム工法を適用した場合の若材齢時の脱枠や型枠の滑動による防液堤コンクリートの表層の品質への影響は表面から20mm以浅の範囲において認められた。
- (4) スリップフォーム工法により構築した防液堤コンクリートは、設計耐用期間の範囲内において、鋼材腐食に対する耐久性を十分に有している。

参考文献

- 1) 西崎丈能, 岡井大八, 近松竜一, 奥立稔, 鎌田文男: PCLNG 貯槽建設工事の合理化研究と実構造物への適用, 土木学会論文集 No.728/VI-58, pp.141-156, 2003.3
- 2) 坂井利光, 矢島雄一, 神代泰道, 江村勝: 東京スカイツリーにおけるスリップフォーム工法による芯柱の構築, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.677-682, 2012.8
- 3) 近松竜一, 桜井邦昭, 大西俊輔, 西崎丈能: 大容量LNG貯槽のPC防液堤を対象としたスリップフォーム工法用コンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 4) 近松竜一, 桜井邦昭, 大西俊輔, 西崎丈能: スリップフォーム工法による大容量LNG貯槽のPC防液堤の施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014
- 5) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, p.87, 1991.7